

# ระบบควบคุมวงโคจรของดาวเทียม Satellite Orbit Control Systems

ดร. มานพ อ้อพิมาย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

# เนื้อหา

- วงโคจรคืออะไร?
- ทำไมต้องมีระบบ OCS ?
- ปัญหาและอุปสรรค
- เทคโนโลยีที่ใช้ในปัจจุบัน
- ปัญหาที่ท้าทายในอนาคต

# วงโคจรของดาวเทียม

- วงโคจร (Orbit) คือ เส้นทางในอวกาศที่ดาวเทียมเคลื่อนที่ไปรอบโลก
  - เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของจุดศูนย์กลางมวล (Translational Motion) ตามกฎการเคลื่อนที่ของ Newton
- ถ้าโลกเป็นทรงกลมที่สมบูรณ์ วงโคจรจะเป็นไปตามกฎของ Kepler

$$\sum \vec{F} = m\vec{a}$$

$$\vec{F}_G = \frac{Gm_1m_2}{r^2} \left( \frac{\vec{r}}{r} \right)$$
$$\frac{d^2(\vec{r})}{dt^2} = -\frac{\mu}{r^2} \left( \frac{\vec{r}}{r} \right)$$

# ชนิดของวงโคจร

- **Geostationary Orbits**

- อยู่ห่างจากพื้นโลกในแนวเส้นศูนย์สูตร 35,790 km
- คาบเวลาของวงโคจรเท่ากับอัตราการหมุนรอบตัวเองของโลก

- **Polar Orbits**

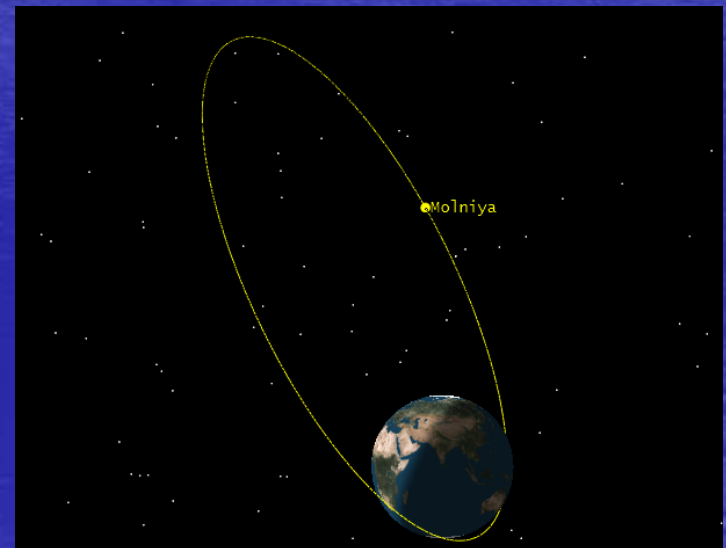
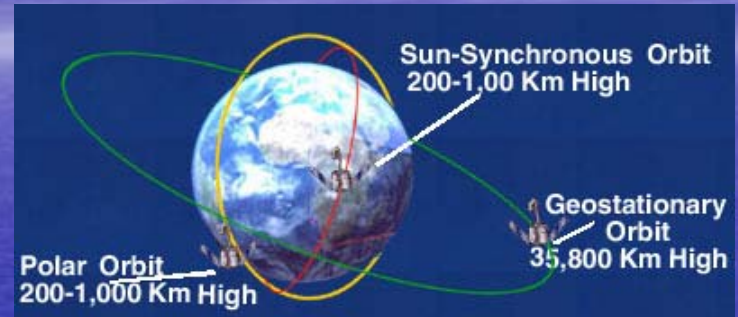
- โคจรในแนวขั้วโลกเหนือและใต้
- อยู่ในวงโคจรต่ำ (<1000 km)
- มักใช้แบบ sun-synchronous orbit (I ~ 98 องศา)

- **Inclined Orbits**

- ความเอียงของระนาบวงโคจรอยู่ระหว่าง 0-90 องศา

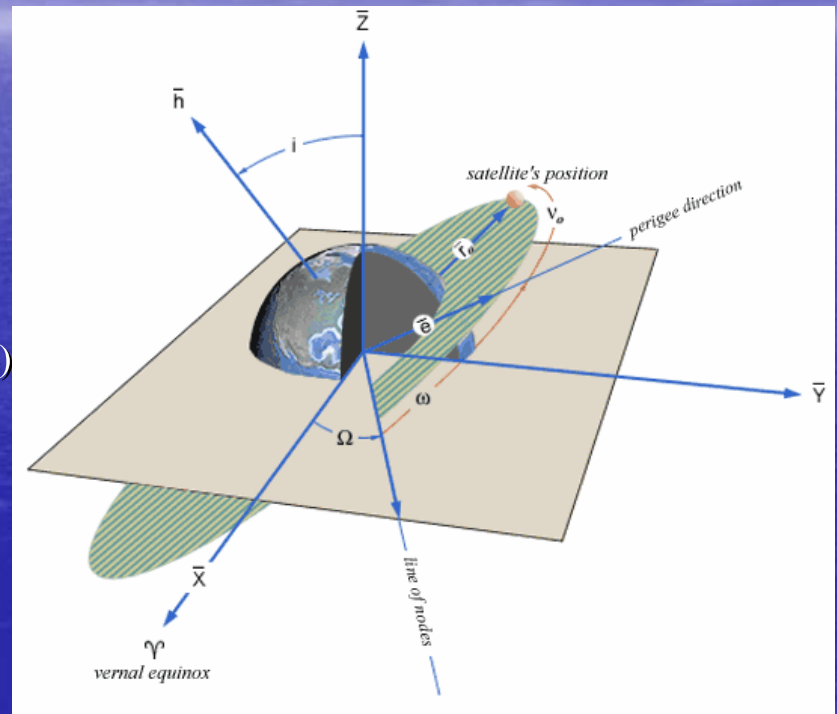
- **Specialized Orbits**

- Molniya orbit (I = 63.4 องศา)
- Frozen orbit (near-circular)
- อื่นๆ



# การอธิบายลักษณะวงโคจร

- อธิบายได้ด้วย Keplerian elements
  - $a$ : ขนาด
  - $e$ : รูปปร่าง
  - $i$ : มุมเอียงเทียบกับระนาบเส้นศูนย์สูตร
  - $\omega$ : ตำแหน่งที่ใกล้พื้น โลกมากที่สุด (Perigee)
  - $\Omega$ : ตำแหน่งที่โคจรผ่านระนาบเส้นศูนย์สูตร
  - $v_0$ : ตำแหน่งในปัจจุบันเมื่อเทียบกับ perigee
- NORAD แสดงข้อมูลลักษณะวงโคจรของดาวเทียมผ่านทาง Two-Line Elements



```
1 27651U 03004A 07083.49636287 .00000119 00000-0 30706-4 0 2692
2 27651 039.9951 132.2059 0025931 073.4582 286.9047 14.81909376225249
```

# เส้นทางเดินของดาวเทียมบนพื้นโลก

## Satellite Ground Track

- เป็นตำแหน่งของดาวเทียมที่ฉายลงมาบนพื้นโลก
- มีประโยชน์มากต่อการวางแผนใช้งานดาวเทียม
- ลักษณะของ ground track จะขึ้นอยู่กับลักษณะของวงโคจร
- เส้นทาง ground track จะกลับมาทับเส้นเดิมเมื่อจำนวนรอบการโคจรสัมพันธ์กับจำนวนการหมุนรอบตัวเองของโลก

$$kP = d \frac{2\pi}{\omega_e}$$



# ปัญหาของการควบคุมวงโคจรดาวเทียม

- วงโคจรไม่ได้เป็นวงรีตามอุดมคติ (Keplerian Orbit) เนื่องจากถูกรบกวนจากแรงภายนอก
  - โลกไม่เป็นทรงกลมที่สมบูรณ์ (Earth Oblateness)
  - แรงดึงดูดจากดวงอาทิตย์และดวงจันทร์ (Luni-Solar Attraction)
  - แรงต้านจากโมเลกุลอากาศ (Atmospheric Drag)
  - แรงดันจากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ (Solar Radiation Pressure)
  - อื่นๆ

# ผลจากการที่โลกไม่เป็นทรงกลมสมบูรณ์

- โลกของเรามีรูปร่างคล้ายลูกแพร์ (Pear-Shape)
  - เส้นผ่าศูนย์กลางในแนวเส้นศูนย์สูตรยาวกว่าแนวขั้วเหนือใต้ ประมาณ 43 km
  - รัศมีด้านขั้วโลกเหนือยาวกว่าด้านขั้วโลกใต้อยู่ประมาณ 40 m
- เกิดเป็นฮาร์มอนิกส์ของแรงโน้มถ่วง ทำให้วงโคจรเปลี่ยนแปลงอย่างซับซ้อนตลอดเวลา



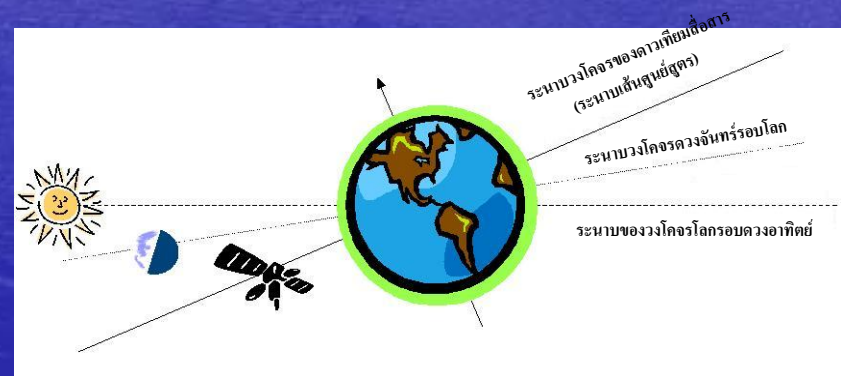
$$V_2 = \frac{\mu}{r} J_2 \left( \frac{R}{r} \right)^2 \left( \frac{1}{4} (3 \cos^2 I - 1) + \frac{3}{4} \sin^2 I \cos 2\lambda \right)$$

ฟังก์ชันแรงโน้มถ่วงจากฮาร์มอนิกส์ที่ 2



# ผลจากแรงดึงดูดของดวงอาทิตย์และดวงจันทร์

- ดวงจันทร์และดวงอาทิตย์เป็นวัตถุนอกโลกที่ส่งผลกับวงโคจรของดาวเทียมมากที่สุด
- ดาวเทียมยิ่งอยู่ห่างจากโลกก็จะยิ่งได้รับผลกระทบมาก
- ความเอียงของวงโคจรดาวเทียมสื่อสารจะถูกรบกวนให้เบี่ยงเบนไปจากระนาบเส้นศูนย์สูตร

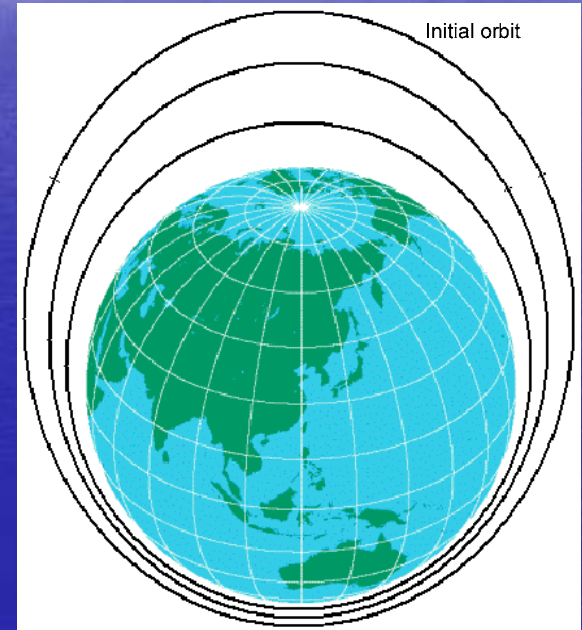


# ผลของแรงต้านจากอากาศ

- ในวงโคจรใกล้โลกยังคงมีโมเลกุลอากาศอยู่
- ดาวเทียมโคจรด้วยความเร็วสูงเมื่อปะทะกับอากาศ จะเกิดแรงต้าน

$$F_d = -\frac{1}{2} \rho v^2 A C_d$$

- เกิดผลทำให้วงโคจรมีขนาดเล็กลง
- การทำนายผลมีความยุ่งยากซับซ้อน เพราะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย
  - ปฏิกริยาต่างๆของควงอาทิตย์
  - ตำแหน่งและเวลาที่ดาวเทียมโคจรผ่าน
  - ระดับความสูงของวงโคจร และรูปร่างของดาวเทียม ฯลฯ



# ผลจากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์

- อนุภาคพลังสูงจากดวงอาทิตย์เมื่อปะทะกับโครงสร้างของดาวเทียมจะทำให้เกิดแรงผลัก

$$F_{SR} = -p_{SR} c_R A$$

- ขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาต่างๆในดวงอาทิตย์
- วงโคจรดาวเทียมเทียมยิ่งสูงจะยิ่งได้รับผลกระทบมาก
- ปัจจุบันมีการคิดค้นเพื่อนำมาใช้ประโยชน์เป็น solar sail



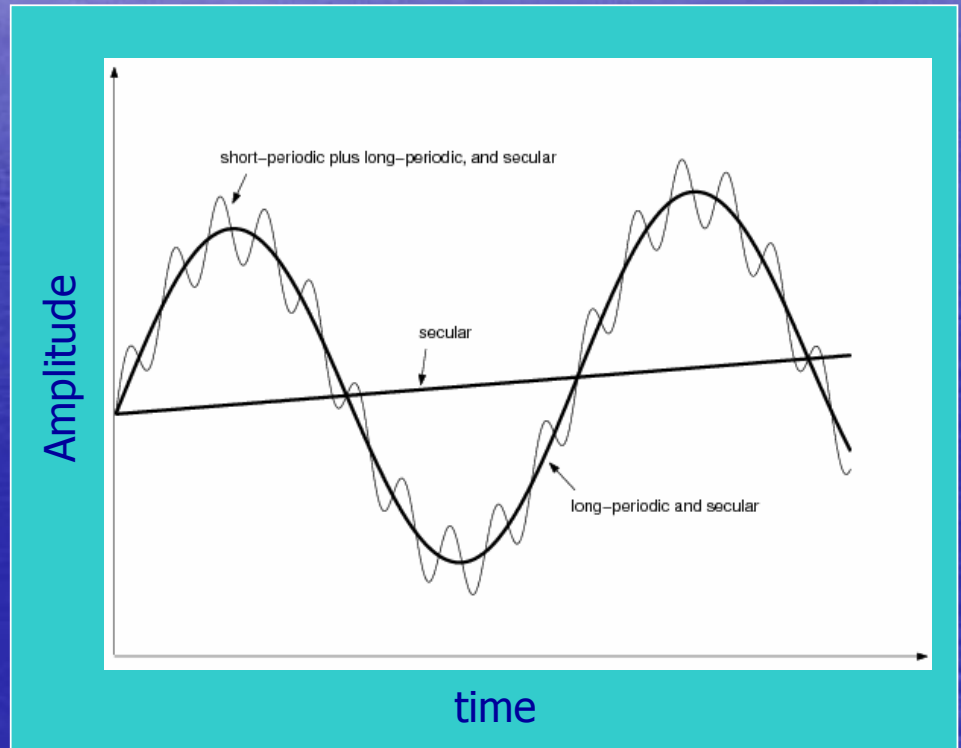
# ผลของแรงรบกวนวงโคจร

ตารางเปรียบเทียบขนาดของแรงกระทำ (ในหน่วย  $m/s^2$ ) ที่ระดับความสูงต่างๆ

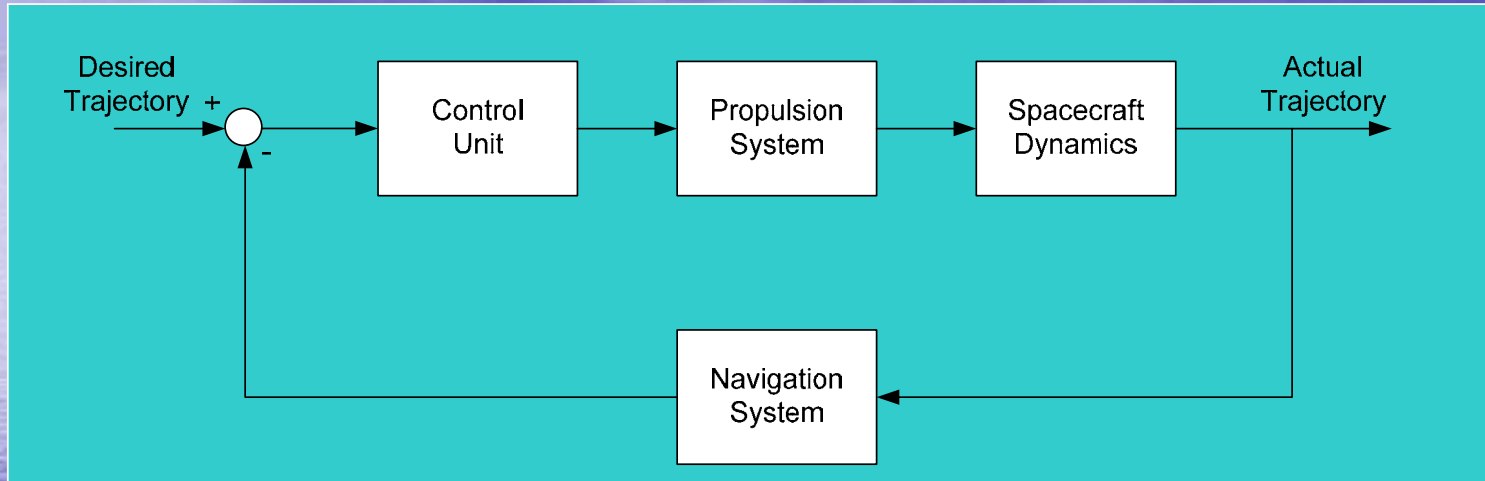
Sources	h = 150 km	h = 750 km	h = 15,000 km	h = 35,800 km
Central Gravity	9.35	7.89	6.42	0.22
Earth Oblateness $J_2$	$3 \times 10^{-2}$	$2 \times 10^{-2}$	$1.4 \times 10^{-2}$	$1.6 \times 10^{-5}$
Earth Oblateness $J_3$	$9 \times 10^{-5}$	$6 \times 10^{-5}$	$4 \times 10^{-5}$	$8 \times 10^{-9}$
Earth Oblateness $J_4$	$7 \times 10^{-5}$	$4 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-9}$
Atmospheric Drag	$3 \times 10^{-3}$	$10^{-7}$	-	-
Luni-Solar Attraction	$10^{-6}$	$10^{-6}$	$10^{-6}$	$7 \times 10^{-5}$
Solar Radiation pressure	$10^{-7}$	$10^{-7}$	$10^{-7}$	$10^{-7}$

# ผลของแรงกวนที่มีต่อวงโคจรของดาวเทียม

- ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่า element ต่างๆ ของวงโคจร
  - แบบคาบสั้น (Short-periodic)
  - แบบคาบยาว (Long-periodic)
  - แบบต่อเนื่อง (Secular)
- ดังนั้นเพื่อให้ดาวเทียมสามารถปฏิบัติการกิจได้จึงต้องมีการควบคุมวงโคจร



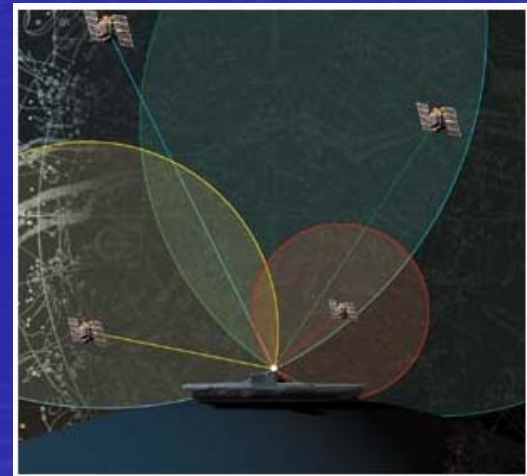
# ระบบควบคุมวงโคจร



- ระบบนำร่อง (Navigation System)
- ระบบสั่งการควบคุม (Control Unit)
  - ประมวลผลและสั่งการจากสถานีควบคุม (Ground-based)
  - ประมวลผลและสั่งการด้วยตัวของดาวเทียมเอง (Autonomous)
- ระบบขับเคลื่อน (Propulsion System)

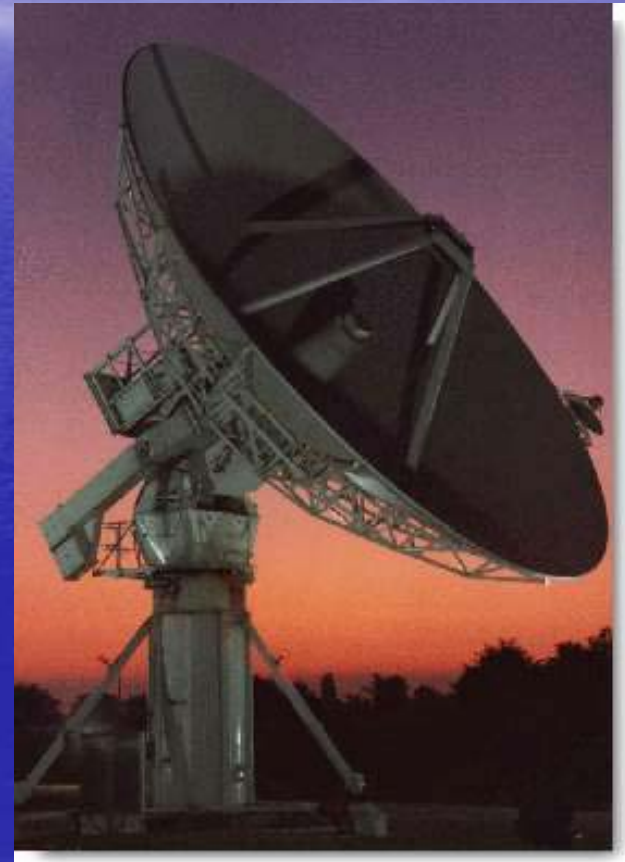
# ระบบนำร่องดาวเทียม

- แบบใช้การรับ/ส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (RF/Radar/Laser/Optical)
  - One-way communication เช่น ระบบ DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite System)
  - Two-way communication เช่น ระบบ DSN (Deep Space Network), SLR (Satellite Laser Ranging)
- แบบ Real-Time สำหรับระบบควบคุมวงโคจรอัตโนมัติ
  - การคำนวณวงโคจรจากการตรวจหาตำแหน่งของโลก ดวงอาทิตย์ และดวงจันทร์ เช่น ระบบ MANS (Microcosm Autonomous Navigation System)
  - Star sensor
  - GPS



# ระบบส่งการควบคุมดาวเทียม

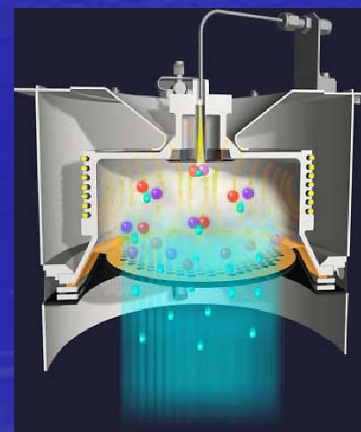
- แบบประมวลผลและสั่งการจากสถานีควบคุม
  - ข้อดี: ปลอดภัย, ง่าย, ไม่ถูกจำกัดทางด้านทรัพยากร
  - ข้อเสีย: ไม่สามารถควบคุมได้เมื่อดาวเทียมไม่โคจรผ่านสถานี, การตอบสนองต่อแรงรบกวนไม่ได้เกิดขึ้นที่ทันที
- แบบประมวลผลและสั่งการด้วยตัวของดาวเทียมเอง
  - ข้อดี: ระบบสามารถตอบสนองต่อแรงรบกวนได้อย่างทันที ทำให้ผลการควบคุมดูก็องแม่นยำ
  - ข้อเสีย: ยุ่งยาก, มีความเสี่ยงสูง, ถูกจำกัดด้วยทรัพยากรที่มีอยู่บนตัวดาวเทียม





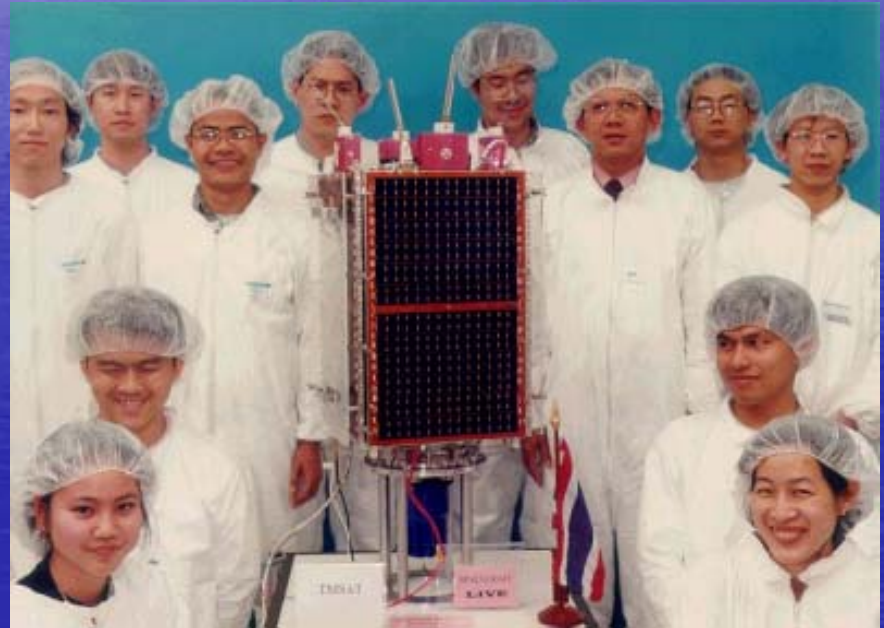
# ระบบขับเคลื่อน

- ชนิดที่ใช้หลักการ Thermodynamics
  - ชนิดเคมี (Chemical rockets) เช่น ใช้ไฮโดรเจนเหลว ( $LH_2$ ) ทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเหลว ( $LOX$ )
  - ชนิดนิวเคลียร์ (Nuclear-fission)
  - ให้พลังขับเคลื่อนมาก
- ชนิดที่ใช้หลักการ Electrodynamics
  - ใช้สนามไฟฟ้าหรือแม่เหล็กเร่งให้อนุภาคมีพลังงานสูง เช่น Ion thruster
  - ให้พลังขับเคลื่อนน้อยแต่ใช้งานได้นาน
- อื่นๆ
  - Solar sail, Atmospheric drag, Tether propulsion ...



# ระบบควบคุมวงโคจรของดาวเทียมไทยพัฒน์

- ภารกิจ: สำรวจพื้นผิวโลก
- ข้อมูลวงโคจร
  - Sun-synchronous orbit
  - Altitude: 800 km
- ระบบนำร่อง
  - 2-Line Element + Orbit Propagator (SGP4)
  - GPS (Experimental)
- ระบบควบคุมวงโคจร
  - ไม่มี



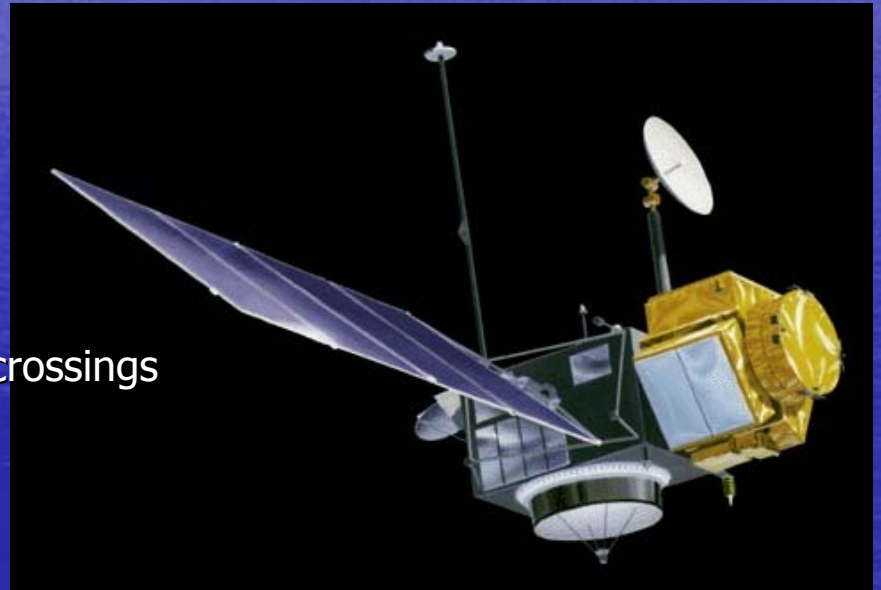
# ระบบควบคุมวงโคจรของดาวเทียม UoSAT-12

- ภารกิจ: สำรวจพื้นผิวโลก
- ข้อมูลวงโคจร
  - Inclination: 64.6 Deg.
  - Altitude: 650 km
  - 7 days repeat groundtrack
  - Accuracy: mean orbital radius within +/- 5 m
- ระบบนำร่อง
  - GPS
- ระบบควบคุมวงโคจร
  - Autonomous
  - 0.3 N Cold-Gas Thruster



# ระบบควบคุมวงโคจรของดาวเทียม Topex/Poseidon

- ภารกิจ: ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำทะเล
- ข้อมูลวงโคจร
  - Inclination: 66 Deg.
  - Altitude: 1,336 km
  - 9.9 days repeat groundtrack
  - Accuracy: +/- 1 km at equator crossings
- ระบบนำร่อง
  - DORIS+SLR+GPS
- ระบบควบคุมวงโคจร
  - Ground-based
  - 1N and 22 N Monopropellant Hydrazine Blow-down Thrusters



# ระบบควบคุมวงโคจรของสถานีอวกาศนานาชาติ

- ภารกิจ: สถานีทดลองทางวิทยาศาสตร์
- ข้อมูลวงโคจร
  - Inclination: 51.6 Deg.
  - Altitude: 333.3 km
  - Accuracy: Semi-major axis within 304.8 m
- ระบบนำร่อง
  - GPS/GLONASS
- ระบบควบคุมวงโคจร
  - Ground-based
  - 2 x 3070 N pressurised Nitrogen Teroxide / unsymmetrical Dimethyl Hydrazine (in Zvezda module)



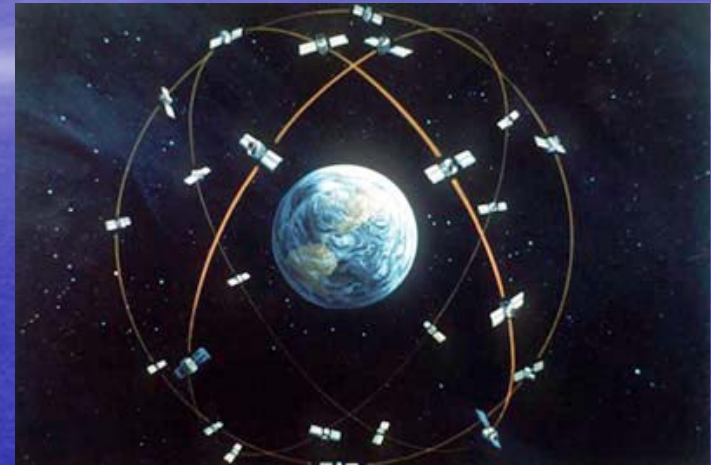
# ระบบควบคุมวงโคจรของดาวเทียม Thaicom-4

- ภารกิจ: สื่อสาร
- ข้อมูลวงโคจร
  - Geostationary
  - 120 Deg. East
  - Accuracy: +/- 0.1 Deg. North-South and East-West Stationkeeping
- ระบบนำร่อง
  - Kalman Filter using Azimuth, Elevation and Range Data from the tracking station
- ระบบควบคุมวงโคจร
  - Ground-based
  - 10 N Chemical bipropellant (Nitrogen tetroxide & Monomethylhydrazine)+ Ion thrusters



# ปัญหาที่ท้าทายในอนาคต

- การควบคุมวงโคจรของดาวเทียมที่ทำงานร่วมกันเป็นกลุ่ม (Satellite Constellation และ Formation Flying)
  - ต้องควบคุมทั้งตำแหน่งของดาวเทียมแต่ละดวงและตำแหน่งสัมพัทธ์ (Relative position) เทียบกับดาวเทียมดวงอื่น
  - ต้องการความถูกต้องของการควบคุมสูง



ขอบคุณครับ